ارزیابی ریسک خطر آتش‌سوزی باز به روش تحلیل درخت خطای فازی

زینب جهانبانی[۱]، فرهنگ سرشکی[۲]، محمد عطایی[۳]، کرامت قنبری[۴]

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۱۶ تاریخ ویرایش: ۹۵/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۱۳

چکیده

زمینه و هدف: آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در تمامی کشورهای تولیدکننده زغال‌سنگ است. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی ریسک آتش‌سوزی باز با استفاده از روش تحلیل درخت خطا در محیط فازی درمجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی است.

روش بررسی: در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) به ریشه‌یابی خطر آتش‌سوزی باز پرداخته شد. به منظور محاسبه احتمال رویدادهای اساسی و در نهایت رسیدن به نرخ احتمال وقوع رویداد نهایی (خطر آتش‌سوزی باز) و با توجه به اینکه دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است، برای تخصیص وزن احتمالات به رویدادهای اساسی از منطق و اعداد فازی استفاده شد. پس از تعیین نرخ احتمال رویدادهای اساسی به کمک منطق فازی، نرخ احتمال رویداد نهایی با استفاده از روابط مربوطه محاسبه شد. در نهایت با استفاده از رابطه فاسل- وسلی، مجموعه‌های برشی حداقل (MCS) رده‌بندی و بحرانی‌ترین آنها نیز مشخص شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که احتمال وقوع خطر آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، ۳۹/۳۸ درصد است که این میزان سطح ریسک بسیار بالایی برای کارکنان درگیر در این صنعت مهم و حیاتی می‌باشد. وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری نیز، به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر شناسایی ش..

نتیجه‌گیری: استفاده از منطق فازی در روش تحلیل درخت خطا سبب افزایش دقت در محاسبات و کاهش ابهام و عدم قطعیت شده ارزیابی‌ها را نیز ساده تر می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آتش‌سوزی باز، معادن زغال‌سنگ، ارزیابی ریسک، روش تحلیل درخت خطا (FTA)، منطق فازی.

مقدمه

آتش‌سوزی یا حریق یکی از قدیمی‌ترین بلایایی است که می‌تواند در زمانی کوتاه، دارایی و سلامتی افراد را به خطر اندازد. آتش‌سوزی عبارت از آتشی است که از یک منبع حرارتی کنترل‌ناپذیر سرچشمه گرفته، یا منبع حرارتی معین کنترل شده‌ای را ترک کرده و با نیروی حرارتی خود گسترش و توسعه یافته باشد. طبق نظریه مثلث حریق که قدیمی‌ترین و معتبرترین تئوری است، برای ایجاد حریق وجود ۳ عامل ضروری است و در صورت حذف حداقل یکی از آن‌ها ادامه حریق ممکن نیست. این عوامل شامل: اکسیژن، حرارت و مواد قابل اشتعال می‌باشند [۱، ۲].

به طور کلی آتش‌سوزی‌هایی که در معادن زغال‌سنگ رخ می‌دهد به دو نوع باز و بسته تقسیم می‌شوند. آتش‌سوزی بسته یا خودسوزی یک فعل و انفعال فیزیکی و شیمیایی است که در آن ابتدا زغال اکسیژن را به طور سطحی جذب و با نفوذ اکسیژن به داخل زغال باعث افزایش دما می‌شود. اگر گرمای ایجاد شده خنثی نشود، واکنش‌های شیمیایی تشدید شده و باعث ظهور پدیده خودسوزی در زغال‌سنگ می‌شود [۳].

آتش‌سوزی باز نیز عبارت است از سوختن اشیاء و لوازم مختلف موجود در معدن بر اثر عواملی مانند: جرقه‌های الکتریکی، اتصال کوتاه در کابل‌های حامل برق، جوشکاری، استفاده از مواد منفجره غیر مجاز و اصطکاک [۳].

پدیده آتش‌سوزی یک خطر جدی و دارای نتایج زیان‌بار اقتصادی، پیامدهای نامطلوب زیست محیطی و خسارت‌ها و مشکلات ناخواسته در زمینه سلامتی است. برای جلوگیری از این نتایج، فرآیندهایی که منجر به

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. f.sereshki@gmail.com
۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
۴- معاونت معدنی منطقه معدنی طزره، شاهرود، ایران.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

وقوع این پدیده می‌شوند باید درک و سپس اقدامات لازم برای جلوگیری از آن به عمل آید. ارزیابی ریسک آتش‌سوزی یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت آتش‌سوزی برای معادن زغالی است [۴].

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه آتش‌سوزی انجام شده است که به برخی از تحقیقات محققان اشاره می‌شود. هوانگ[1] و لیتون[2] در سال ۱۹۸۴ شرایط بحرانی در آتش‌سوزی‌های معدنی را بررسی و ارزیابی کردند [۵]. سینگ و ری[3] در سال ۲۰۰۴، به بررسی مهار حریق تحت شرایط دینامیکی پرداختند [۶]. در سال ۲۰۱۳، در مطالعه‌ای که توسط فوبائو[4] و همکاران انجام شد، روشی جدید برای کنترل آتش‌سوزی در یک معدن با استفاده از نیتروژن مایع مطرح شد. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، این روش در زمینه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی سودمند است و در پیشگیری از حریق در معادن زغال‌سنگ بزرگ مقیاس کاربرد گسترده‌ای دارد [۷]. هانسن[5] نیز در سال ۲۰۱۵، روش‌های محاسبه نرخ حرارت آزاد شده از آتش‌سوزی‌های لوازم نقلیّه در معادن زیرزمینی را بررسی کرد [۸].

در این تحقیق برای ارزیابی ریسک آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی از روش تحلیل درخت خطا[6] که یکی از روش‌های ارزیابی ریسک است [۹]، استفاده شده است. به کارگیری شیوه متداول در حل درخت خطا می‌تواند منجر به افزایش اطلاعات ناکافی در تحلیل ریسک یا افزایش خطای تخمینی آنالیز شود. هم‌چنین می‌توان گفت که مقوله آتش‌سوزی با عدم قطعیت همراه است؛ لذا برای غلبه بر آن مشکلات، در این تحقیق روش تحلیل درخت خطای فازی[7] به کار برده شده است. تئوری فازی، که در آنالیز درخت خطای فازی به کار می‌رود، با اطلاعات ناقص کمّی و غلط و مبهم مقابله می‌کند. در واقع هدف از انجام این مطالعه تخمین احتمال وقوع آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، اولویت‌بندی ریسک‌ها و شناسایی ریسک‌های بحرانی می‌باشد.

این نکته قابل ذکر است که از روش تحلیل درخت خطای فازی در صنایع و زمینه‌های معدنی کمتر استفاده شده است.

روش بررسی

ساختار درخت خطا

تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا به عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای تجزیه و تحلیل فرآیند ایمنی سیستم به ویژه در هنگام ارزیابی سیستم‌های بسیار پیچیده و دقیق محسوب می‌شود. به دلیل استفاده از روش قیاسی (رسیدن از کل به جزء) در این روش، بسیاری از تجزیه و تحلیل‌گرهای ایمنی سیستم، به کارگیری روش تحلیل درخت خطا را در بررسی حالات احتمالی مختلف که می‌توانند منجر به بروز رویدادهای مطلوب یا نامطلوب در سطح سیستم شوند، بسیار مفید می‌دانند [۹].

تحلیل درخت خطا یک تکنیک ارزشیابی است که از آن می‌توان برای تخمین احتمال وقوع یک رخداد خطرناک پیش بینی شده، استفاده کرد. در این روش ابتدا همه راه‌هایی که می‌توانند سبب بروز این وضعیت ناخواسته و نامطلوب شوند جستجو می‌شود. سپس به صورت نظام‌مند، تمامی دلایل خرابی را در یک ساختار بالا به پائین که شبیه درخت است، مرتب کرده و در نهایت از این ساختار برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی[8] استفاده می‌شود [۱۰].

ارزیابی درخت خطا

تحلیل درخت خطا می‌تواند هم به صورت کمّی[9] و

[1]- Hwang
[2]- Litton
[3]- Singh & Ray
[4]- Fu-bao
[5]- Hansen
[6]- Fault Tree Analysis= FTA
[7]- Fuzzy Fault Tree Analysis= FFTA
[8]- Top event
[9]- Quantitative

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

هم به صورت کیفی یا نظری[10] انجام شود [۹].

تحلیل کیفی: تحلیل کیفی به منظور محاسبه مجموعه برشی حداقل[11] انجام می‌شود. یک مجموعه برشی[12]، ترکیبی از رویدادهای اساسی[13] است که منجر به وقوع رویداد نهایی می‌شوند [۱۱، ۱۲].

هر یک از مجموعه‌های برشی حداقل نمایانگر یک راه احتمالی برای وقوع رویداد نهایی می‌باشد. بدین ترتیب که با رخ دادن رویدادهایی که در یک برش حداقل قرار دارد رویداد نهایی به وجود خواهد آمد. بنابراین تجزیه و تحلیل آنها ارزیابی اهمیّت هر یک از راه‌های احتمالی بروز رویداد اصلی است [۹].

تحلیل کمّی: در تحلیل کمّی درخت خطا برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی باید احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی معلوم باشد. با معلوم بودن احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی، می‌توان با توجه به نوع درگاه‌های[14] مورد استفاده، احتمال رویداد نهایی را به دست آورد.

احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی[15] که درگاه ارتباطی آنها "و"[16] است با به کارگیری رابطه (۱) و احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی که درگاه ارتباطی آنها "یا"[17] است با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۳]:

$$P = \prod_{i=1}^{n} p_i \qquad (۱)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i) \qquad (۲)$$

که در آن P: احتمال وقوع رویداد خروجی درگاه، n: تعداد رویدادهای ورودی درگاه و p_i: احتمال وقوع هر یک از رویدادهای ورودی درگاه می‌باشد.

ارزیابی ریسک آتش‌سوزی باز به روش تحلیل درخت خطای فازی

ارزیابی مخاطرات شامل دو مقوله کمّی و کیفی است. در این خصوص از تکنیک‌های مختلفی نظیر تحلیل درخت خطا می‌توان استفاده کرد. تحلیل درخت خطا یک روش ارزیابی کمّی است. البته این کار زمانی انجام می‌شود که ارزیاب اطلاعات کافی در مورد نرخ و احتمال شکست تجهیزات داشته باشد. تجزیه و تحلیل درخت خطا یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود. گاهی اوقات به دلیل عدم اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان شکست از اجزا یا احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته دشوار است. علاوه بر این، به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد اساسی، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. برای جلوگیری از چنین شرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر کارشناسان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کار برد تا ابهام و عدم وجود داده در رویدادهای اساسی را کاهش دهد [۱۲].

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی اقدام به تعیین احتمال آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی گردید. بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، رویدادهای میانی و رویدادهای اساسی خطر آتش‌سوزی باز تهیه شد که در جدول ۱ لیست این رویدادها نشان داده شده است. سپس با توجه به نتایج جدول ۱، درخت خطای مربوطه رسم شده است که این درخت خطا پایه اصلی برای محاسبات نرخ شکست سیستم گردید (شکل ۲).

با استفاده از درخت خطای ایجاد شده و در نظر گرفتن رویدادهای اساسی با توجه به اینکه اطلاعات لازم در خصوص تعیین احتمال شکست رویداد اساسی وجود نداشت از منطق فازی برای تعیین نرخ احتمال استفاده شد. این مراحل با انتخاب تیمی متشکل از متخصصان و کارشناسان مربوطه شروع و به برآورد

[10]- Qualitative / Subjective
[11]- Minmal cut set = MCS
[12]- Cut set
[13]- Basic event = BE
[14]- Gates
[15]- Intermediate event
[16]- And gate
[17]- Or gate

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

احتمال ختم شد. در ادامه نحوه اجرای منطق فازی بیان شده است.

انتخاب کارشناسان

هنگامی که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، از نظر کارشناسان استفاده می‌شود. در این تحقیق ۱۰ کارشناس برای تعیین وزن انتخاب گردید. قابل ذکر است که این کارشناسان اهمیّت وزنی یکسانی ندارند. به همین دلیل برای تعیین وزن اهمیّت کارشناسان از روش ارائه شده توسط لواسانی[۱۸] و همکارانش در سال

جدول ۱- رویدادهای میانی و اساسی خطر آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد
T	خطر آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی	نهایی
E1	اتصال کوتاه	میانی
E2	مواد منفجره	میانی
E3	گاز و هوای فشرده	میانی
E4	تجهیزات دیزلی و مکانیکی	میانی
E5	جوشکاری	میانی
E6	جرقه الکتریکی ناشی از برق	میانی
X1	اتصال کوتاه در داخل کابل‌های حامل برق	اساسی
X2	اتصال کوتاه در اثر ریزش سنگ روی کابل	اساسی
X3	همراه داشتن تجهیزات دیزلی از مواد سوختنی	اساسی
X4	نبود کپسول اطفاء حریق همراه با تجهیزات دیزلی	اساسی
X5	ایجاد نشت مواد سوختنی در تجهیزات دیزلی	اساسی
X6	عدم کنترل میزان گرمای تولیدی در تجهیزات دیزلی (عدم نصب رله حرارتی، نبود سنسور حساس به گرما به میزان کمتر از نقطه اشتعال)	اساسی
X7	نبود برنامه تعمیرات و نگهداری و اجرای آن در تجهیزات دیزلی	اساسی
X8	وجود گاز و عدم کنترل گاز محل آتشباری	اساسی
X9	عدم آب‌پاشی و مجهز نبودن محل آتشباری به آب (در محلی که مواد منفجره غیر امولسیونی می‌باشد)	اساسی
X10	عدم تهویه مناسب در محل آتشباری	اساسی
X11	وجود مواد و تجهیزات قابل اشتعال در محل عملیات آتشباری	اساسی
X12	جریان آزاد هوای فشرده در زمان آتشباری	اساسی
X13	عدم وجود تجهیزات اطفاء حریق در محل آتشباری	اساسی
X14	عدم کنترل گازهای موجود در هوای فشرده که احتمال ایجاد یا کمک‌کننده به اشتعال می‌باشند (نظیر هیدروژن، اکسیژن، متان و ...)	اساسی
X15	عدم کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی‌های ویژه‌ای در خطوط لوله	اساسی
X16	عدم استفاده از روغن‌های با دمای تجزیه و اشتعال بالا با توجه به ظرفیت هوای فشرده تولیدی توسط کمپرسور	اساسی
X17	عدم کنترل مستمر دمای هوای فشرده و استفاده از خنک‌کننده‌های مجاز	اساسی
X18	عدم ایجاد جریان تهویه مستمر برای رقیق نمودن گازهای قابل اشتعال تولیدی	اساسی
X19	وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری	اساسی
X20	مرطوب نبودن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری	اساسی
X21	عدم وجود تجهیزات مناسب اطفاء حریق در محل عملیات جوشکاری	اساسی
X22	عدم برقراری مستمر جریان هوای تهویه در محل جوشکاری	اساسی
X23	عدم نظارت مستمر قبل و بعد از عملیات جوشکاری	اساسی
X24	عدم حذف مواد قابل اشتعال	اساسی
X25	عدم قطع اتصالات طرفین محل جوشکاری از نقطه جوشکاری	اساسی
X26	عدم وجود کلید (فیوز) در هر مدار جریان برق کابل‌های مرتبط به هر دستگاه	اساسی
X27	عدم وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه)	اساسی
X28	عدم کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش (عایق)	اساسی
X29	قرار دادن و یا نزدیک نمودن اشیایی به کابل‌ها که ممکن است اتصالی و یا جرقه تولید کنند	اساسی
X30	عدم تهویه مناسب و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره‌دار و کابل‌های ساده روپوش‌دار	اساسی
X31	عدم وجود تجهیزات اطفاء حریق مناسب با رعایت فاصله	اساسی

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

جدول ۲- جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان [۱۵].

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
		مدیر، معاون	۴
۱	عنوان	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۳
		سرپرست کارگاه، سرکارگر	۲
		اپراتور	۱
		۳۰<	۴
۲	تجربه	۲۰-۳۰	۳
	(سال)	۱۰-۲۰	۲
		۵-۱۰	۱
		دکترا	۵
		کارشناس و کارشناس ارشد	۴
۳	تحصیلات	دیپلم	۳
		دارای مدرک فنی	۲
		زیر دیپلم	۱
		۵۰<	۴
۴	سن	۴۰-۵۰	۳
	(سال)	۳۰-۴۰	۲
		۳۰>	۱

۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و رنجیت[19] و همکارانش استفاده شده است [۱۳-۱۵].

در تعیین وزن اهمیّت کارشناسان از معیارهای عنوان، تجربه کاری، تحصیلات و سن استفاده شده است. نحوه امتیازدهی کارشناسان در جدول ۲ نشان داده شده است.

تعیین وزن کارشناسان و کمّی‌سازی نظرات آنها

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آنها تعیین گردید. نمره وزن نهایی هر کارشناس از تقسیم مجموع نمرات کسب شده توسط وی تقسیم بر مجموع نمرات کسب شده توسط کلیه کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه به دست آمده است. نمره وزن هر کارشناس بر اساس معیارهای تعیین شده در مرحله قبل، در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای کمّی‌سازی نظرات کارشناسان یا تعیین وزن نظرات آنها در خصوص رویدادهای اساسی، از متغیرهای زبانی استفاده شده است. پنج متغیر زبانی به کار رفته شامل خیلی‌کم، کم، متوسط زیاد و خیلی زیاد هستند که به طور خلاصه به صورت {VH، H، M، L، VL} است. برای فازی کردن این بخش از عدد فازی ذوزنقه‌ای استفاده شده است که شکل ۳ بیان کننده دامنه فازی متغیرهای زبانی به کار رفته در این تحقیق است.

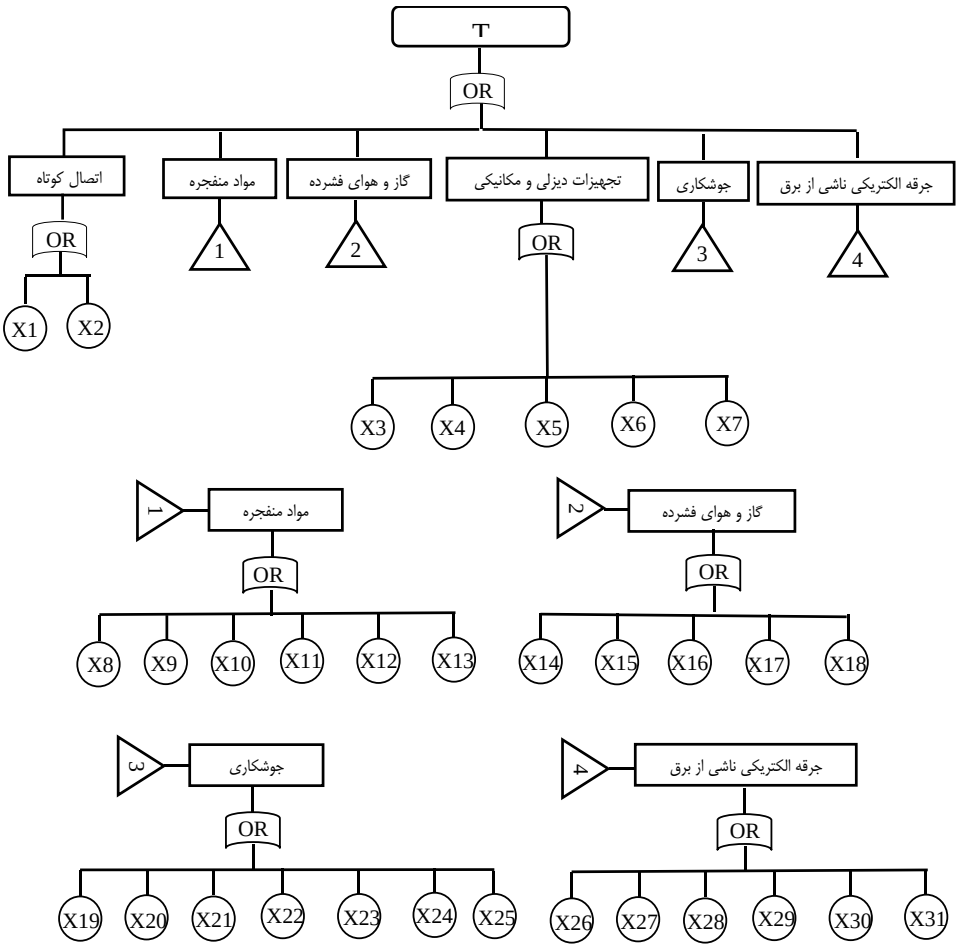
نظرات کارشناسان با استفاده از روش ارائه شده توسط چن[20] و هوانگ[21] در سال ۱۹۹۲، لواسانی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و همچنین رنجیت و همکارانش، به صورت کمّی درآمد و وزن آنها تعیین گردید [۱۳-۱۶].

برای استفاده از نظرات کارشناسان فرم‌هایی برای آنها ارسال شد که در این فرم از کارشناسان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیّت هر یک از پارامترها امتیاز خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را به آنها اختصاص دهند که وزن متغیرهای زبانی کارشناسان که در کمّی‌سازی نظر آنان در رابطه با هر رویداد اساسی استفاده شده است،

[19]- Renjith

[20]- Chen
[21]- Hwang

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]



شکل ۱- درخت خطای مربوط به خطر آتش‌سوزی باز در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی

در جدول ۴ نشان داده است.

اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشناسان، نمره وزن هر کارشناس در نمره متغیرهای زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه ۳ انجام شده است [۱۵، ۱۷].

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} W_j A_{ij} \qquad (i = 1,2,3,\dots,m) \qquad (۳)$$

که در این رابطه:

A_{ij}: متغیر زبانی در رابطه با هر رویداد اساسی i توسط کارشناس j

W_j: وزن کارشناس j

m: تعداد رویدادهای اساسی

n: تعداد کارشناسان

M_i: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی i

غیر فازی کردن

غیر فازی کردن اعداد فازی روش مهمّی برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. در این تحقیق روش مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن انتخاب شده

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

جدول ۳- نمرات وزنی کارشناسان انتخاب شده

کارشناسان	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن (سال)	شاخص وزنی	نمره وزنی هر کارشناس
۱	۲	۲	۴	۲	۱۰	۰/۰۹۵
۲	۳	۱	۴	۳	۱۱	۰/۱۰۴
۳	۲	۲	۴	۲	۱۰	۰/۰۹۵
۴	۳	۲	۴	۲	۱۱	۰/۱۰۴
۵	۴	۲	۴	۲	۱۲	۰/۱۱۴
۶	۲	۱	۴	۲	۹	۰/۰۸۵
۷	۴	۲	۴	۲	۱۲	۰/۱۱۴
۸	۲	۲	۴	۲	۱۰	۰/۰۹۵
۹	۲	۱	۴	۲	۹	۰/۰۸۵
۱۰	۴	۱	۴	۲	۱۱	۰/۱۰۴
					جمع: ۱۰۵	جمع: ۱

است. این روش توسط سوگنو[22] در سال ۱۹۸۵ توسعه یافته است و دقیق‌ترین روش غیر فازی کردن می‌باشد. غیر فازی کردن عدد فازی ذوزنقه‌ای $A^{\sim} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ با استفاده از فرمول (۴) به دست می‌آید [۱۳، ۱۴].

$$X^* = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}} \frac{(\boldsymbol{a_4}+\boldsymbol{a_3})^2 - \boldsymbol{a_4 a_3} - (\boldsymbol{a_1}+\boldsymbol{a_2})^2 +}{(\boldsymbol{a_4}+\boldsymbol{a_3}-\boldsymbol{a_2}-\boldsymbol{a_1})} \quad (۴)$$

عدد به دست آمده از مرحله قبل در رابطه با هر رویداد اساسی، معادل نظر کارشناسان بوده و هنوز به صورت "امکانی" است. در این مرحله با استفاده از مدل مرکز گرانیگاه (رابطه ۴) و فرمول ذوزنقه‌ای، این اعداد غیر فازی شده است.

استفاده از تبدیل فرمول امکان به احتمال

عدد حاصل از مرحله غیر فازی کردن، هنوز به صورت امکانی می‌باشد. از آنجایی که درخت خطا احتمال می‌پذیرد؛ لذا باید عدد به دست آمده از مرحله قبل از حالت امکانی به احتمالی تبدیل گردد. به این منظور، از فرمول‌های ارائه شده توسط انیساوا (فرمول ۵ و ۶)، استفاده شده است [۱۳-۱۵].

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (۵)$$

$$K = [\frac{(1-CFP)}{CFP}]^{1/3} \times 2/351 \quad (۶)$$

که در این رابطه، FP[23] نرخ احتمال هر رویداد اساسی و CFP[24] عدد امکانی حاصل از مرحله غیر فازی کردن است. در جدول ۵ نتایج محاسبات نرخ احتمال (FP) هر رویداد اساسی برای خطر آتش‌سوزی باز نشان داده شده است.

تعیین احتمال رویدادهای نهایی و میانی

بعد از تعیین نرخ احتمال رویدادهای اساسی و هم‌چنین مشخص کردن مجموعه‌های برشی حداقل و به کمک بانک اطلاعات به دست آمده، نرخ احتمال رویداد نهایی (T) و هم‌چنین رویدادهای میانی به کمک روابط (۲)، (۳) و (۷) محاسبه شد که نتایج این محاسبه در جدول ۶ نشان داده است.

لازم به ذکر است که چون تمامی درگاه‌ها در ساختار درخت خطا از نوع درگاه "یا" هستند؛ لذا مجموعه‌های

[22]- Sugeno

[23]- Failure Probability

[24]- Crisp Failure Possibility

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

برشی حداقل همان رویدادهای اساسی هستند.

$$T = 1 - [(1 - MCS_1) \times (1 - MCS_2) \times \dots \times (1 - MCS_n)] \quad (۷)$$

که در این رابطه:

T: نرخ احتمال رویداد نهایی، MCS_1: مجموعه برشی حداقل اول، MCS_2: مجموعه برشی حداقل دوم و ... و MCS_n: مجموعه برشی حداقل n ام [۱۸، ۱۹].

تعیین میزان اهمیّت و رده‌بندی مجموعه‌های برشی حداقل

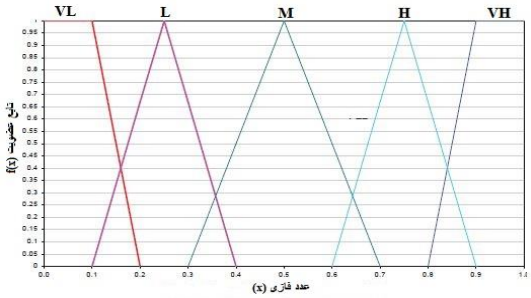
بعد از محاسبه نرخ رویداد نهایی و بر اساس مقدار به دست آمده برای آن، با استفاده از فرمول فاسل-وسلی[۲۵] (رابطه ۸) میزان اهمیّت مجموعه‌های برشی حداقل (MCS) مشخص و این مجموعه‌های برشی حداقل رده‌بندی شدند که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

$$FVI(i) = \frac{MCS_i}{T} \quad (۸)$$

یافته‌ها

بر اساس محاسبات انجام شده نرخ احتمال رویداد نهایی، خطر آتش‌سوزی باز، در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، ۳۹/۳۸ درصد است. بنابراین دارای میزان نرخ احتمال شکست بالائی است.

هم‌چنین بر اساس یافته‌های جدول ۷، بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی حداقل (ریسک‌های بحرانی) در خطر آتش‌سوزی باز به ترتیب میزان اهمیّت از زیاد به کم، وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری، وجود مواد و تجهیزات قابل اشتعال در محل عملیات آتشباری، عدم حذف مواد قابل اشتعال، مرطوب نبودن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری و وجود



شکل ۲- متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان [۱۴]

جدول ۴- وزن متغیرهای زبانی در کمّی کردن نظر کارشناسان [۱۴]

متغیر زبانی	وزن ترم‌های زبانی			
خیلی کم (VL)	۰	۰	۰/۱	۰/۲
کم (L)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۴
متوسط (M)	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۷
زیاد (H)	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۹
خیلی زیاد (VH)	۰/۸	۰/۹	۱	۱

گاز و عدم کنترل گاز محل آتشباری هستند؛ لذا در زیر، اقدامات لازم به منظور کنترل و کاهش ریسک‌های بحرانی تعیین شده ارائه شده است.

- نصب سنسورهای اندازه‌گیری گاز و سیستم‌های پایش در مناطق مختلف معدن.
- حذف مواد قابل اشتعال.
- مرطوب کردن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آتش‌سوزی باز به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات معدنکاری زغال در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بررسی احتمال شکست رویداد اساسی، مبنای اصلی تحلیل درخت خطا می‌باشد که به کمک منطق فازی کمّی می‌گردد. استفاده از منطق فازی در درخت خطا هم ارزیابی‌ها را ساده‌تر کرده و هم می‌تواند باعث افزایش دقت در محاسبات شود. با توجه به مطالعات صورت گرفته، احتمال شکست رویداد اساسی به کمک اعداد فازی به وسیله کارشناسان مختلف متفاوت خواهد بود. در این شرایط صحت انتخاب عدد فازی برای

[25]- Fussell- Vesely

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

جدول ۵- نرخ احتمال هر رویداد اساسی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP) برای خطر آتش‌سوزی باز

نماد رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نماد رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نماد رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)
X1	۰/۰۱۵۹	X12	۰/۰۱۲۷	X23	۰/۰۲۰۸
X2	۰/۰۰۹۲	X13	۰/۰۱۱۱	X24	۰/۰۲۷۵
X3	۰/۰۱۱۲	X14	۰/۰۱۸۷	X25	۰/۰۱۳۷
X4	۰/۰۱۹۹	X15	۰/۰۰۳۹	X26	۰/۰۱۵۲
X5	۰/۰۱۲۱	X16	۰/۰۰۵۷	X27	۰/۰۱۵۵
X6	۰/۰۰۹۴	X17	۰/۰۰۸۳	X28	۰/۰۱۸۶
X7	۰/۰۰۸۳	X18	۰/۰۱۴۴	X29	۰/۰۱۹۱
X8	۰/۰۲۴۰	X19	۰/۰۴۵۱	X30	۰/۰۱۲۵
X9	۰/۰۰۸	X20	۰/۰۲۵۴	X31	۰/۰۰۷۱
X10	۰/۰۲۱۶	X21	۰/۰۱۳۴		
X11	۰/۰۳۳۷	X22	۰/۰۱۳۷		

جدول ۶- نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی برای خطر آتش‌سوزی باز

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال رویداد
T	خطر آتش‌سوزی باز	نهایی	۰/۳۹۳۸
E1	اتصال کوتاه	میانی	۰/۰۲۴۹
E2	مواد منفجره	میانی	۰/۱۰۶۳
E3	گاز و هوای فشرده	میانی	۰/۰۵۰۰
E4	تجهیزات دیزلی و مکانیکی	میانی	۰/۰۵۹۴
E5	جوشکاری	میانی	۰/۱۴۹۴
E6	جرقه الکتریکی ناشی از برق	میانی	۰/۰۸۴۸

نشان دادن رویداد اساسی، بسیار اساسی است. در نهایت این روش می‌تواند با کاهش عدم قطعیت و ابهامات موجود، به بهبود قابلیت اطمینان و کاهش میزان خسارات و صدمات وارد به سیستم کمک نماید. در این تحقیق با استفاده از روش فازی نه تنها به کارشناسان وزن داده شد، بلکه با استفاده از غیر فازی کردن وزن رویدادهای اساسی، وزن هر رویداد مورد سنجش قرار گرفت. وجه افتراق روش به کار رفته در مطالعه تیاگی و همکارانش [۲۰] با مطالعه حاضر در همین قسمت بوده که شاید نقطه قوت مطالعه حاضر در خصوص کمّی‌سازی و افزایش دقت محاسبه ضریب هر رویداد انتهایی به شمار می‌رود.

انجام این مطالعه کمک می‌کند تا با نگاه جدیدتر و نوآورانه‌تری به تکنیک درخت خطا پرداخت. روش‌های مرسوم تحلیل درخت خطا نیاز به یک پایگاه داده برای رویدادهای اساسی دارد ولی تلفیق تحلیل درخت خطا با منطق فازی، محدودیت‌های عدم وجود داده و بانک اطلاعاتی را تا حدودی مرتفع نموده و می‌توان به کمک منطق فازی رویدادهای اساسی کیفی را کمّی ساخت. با این کار عدم قطعیت نیز تا حدود زیادی بهبود می‌یابد. بدین وسیله می‌توان نرخ رویداد نهایی را محاسبه نمود. هم‌چنین می‌توان با کمّی کردن رویدادهای اساسی، میزان نرخ مشارکت هر رویداد اساسی را در میزان رویداد نهایی به دست آورد و با توجه به احتمال و اولویت هر رویداد اساسی با اقدامات اصلاحی مناسب آنها را مرتفع نمود.

محدود بودن تعداد کارشناسان و استفاده از کارشناسانی با ویژگی‌های متفاوت از محدودیت‌های

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

جدول ۷- نرخ احتمال، میزان اهمیّت و رده‌بندی مجموعه‌های برشی حداقل و مقادیر FVI(i) برای خطر آتش‌سوزی باز

نماد رویداد	**FVI(i)**	رده‌بندی برش‌های حداقل (MCS)	نماد رویداد	**FVI(i)**	رده‌بندی برش‌های حداقل (MCS)
X1	۰/۰۴۰۳	۱۲	X17	۰/۰۲۱۰	۲۷
X2	۰/۰۲۳۳	۲۵	X18	۰/۰۳۶۵	۱۵
X3	۰/۰۲۸۴	۲۲	X19	۰/۱۱۴۵	۱
X4	۰/۰۵۰۵	۸	X20	۰/۰۶۴۴	۴
X5	۰/۰۳۰۷	۲۱	X21	۰/۰۳۴۰	۱۸
X6	۰/۰۲۳۸	۲۴	X22	۰/۰۳۴۷	۱۷
X7	۰/۰۲۱۰	۲۶	X23	۰/۰۵۲۸	۷
X8	۰/۰۶۰۹	۵	X24	۰/۰۶۹۸	۳
X9	۰/۰۲۰۳	۲۸	X25	۰/۰۳۴۷	۱۶
X10	۰/۰۵۴۸	۶	X26	۰/۰۳۸۵	۱۴
X11	۰/۰۸۵۵	۲	X27	۰/۰۳۹۳	۱۳
X12	۰/۰۳۲۲	۱۹	X28	۰/۰۴۷۲	۱۱
X13	۰/۰۲۸۱	۲۳	X29	۰/۰۴۸۵	۹
X14	۰/۰۴۷۴	۱۰	X30	۰/۰۳۱۷	۲۰
X15	۰/۰۰۹۹	۳۱	X31	۰/۰۱۸۰	۲۹
X16	۰/۰۱۴۴	۳۰			

عمده این مطالعه به شمار می‌رود. عدم آزمایش تجربی به منظور تعیین صحت و دقت نتایج به دست آمده از دیگر محدودیت‌های این مطالعه به شمار می‌رود. ارائه روشی برای کمّی کردن رویدادهای با پایه کیفی از نقاط قوت این مطالعه به شمار می‌رود.

منابع

1. Jahangiri M. Fire Safety Tenet, Tehran: Fan-Avaran. 2015 [Persian].
2. Golmohammadi R. Fire Engineering, Tehran: Fan-Avaran [Persian].
3. Ham B. A Review of Spontaneous Combustion Incident. Coal operators ' conference. 2005; 237-242.
4. Saffari A. Presentation of an Engineering Classification System for Risk Assessment of Spontaneous Combustion Coal in Coal Mines, [Master of Science Thesis]. Shahrood: Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University. 2014 [Persian].
5. Hwang CC, Litton CD. A Study of Critical Conditions in Mine Fires. Twentieth Symposium (International) on Combustion; 1984, 1673-1679.
6. Singh RP, Ray SK. Study on control of disastrous open fires in underground coalmines. Journal of Scientific & Industrial Research. 2004; 63: 1010-1018.
7. Fu-bao Z, Bo-bo S, Jian-wei C. A New Approach to Control a Serious Mine Fire with Using Liquid Nitrogen as Extinguishing Media. Fire Technology Journal. 2013.
8. Hansen R. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. Fire Safety Journal. 2015;194-216.
9. Mohammadfam A. Safety Engineering, 6. Tehran: Fan-Avaran: 2012 [Persian].
10. Abdelgawad M, Fayek AR. Fuzzy reliability analyzer: A quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault tree analysis. J.Constr. Manage Eng; 2011, 137(4): 294- 302.
11. Abdollahzadeh G, Rastgoo S. Risk Assessment in Bridge Projects by using Fuzzy Fault Tree Analysis. National Conference on Civil Engineering & Sustainable Development; 2013 [Persian].
12. Abdollahzadeh G, Rastgoo S. Risk Assessment in Bridge Projects by using Fuzzy Fault Tree Analysis. Journal of Transportation; 2015, 1: 85-100 [Persian].

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

13. Lavasani M.R, Wang J, Yang Z, Finlay J. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on Oil and Gas Offshore Pipelines. Int. J. Mar. Sci. Eng; 2011;29-42 [Persian].

14. Lavasani SM, Zendgani A, Celik M. An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry. Process Sarety and Environment Protection; 2014 [Persian].

15. Renjith VR, Madhu G, Lakshmana Gomathi Nayagam V, Bhasi AB. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. Journal of Hazardous Materials. 2010;103-110.

16. Chen SJ, Hwang CL. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. 1st Ed. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg; 1992, ISBN: 3-540-54998-6.

17. Clemen RT, Winkler RL. Combining probability distributions from experts in risk analysis. Risk analysis. 1999;187-203.

18. Kolasangiani H, Omidvari M. Presenting a model for quantitative risk assessment of low voltage electrocution in electricity distribution industry using FTA in fuzzy environment. Iran Occupational Health. 2015;2 [Persian].

19. Mirza S, Jafari MJ, Omidvari M, Miri Lavasani SMR. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention. 2014;2: 113-123 [Persian].

20. Tyagi SK, Pandey D, Tyagi R. Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2010;276-283.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]

Risk assessment of fire by using fuzzy fault tree analysis in Eastern Alborz coal mines

Zeinab Jahanbani[1], Farhang Sereshki[2], Mohammad Ataei[3], Keramat Ghanbari[4]

Received: 2015/12/07 Revised: 2016/06/09 Accepted: 2016/10/04

Abstract

Background and aims: The fires in coal mines are one of the most serious problems in all coal production countries. The purpose of the present study is the risk assessment of fires based on Fault Tree Analysis method in fuzzy environment in Eastern Alborz Coal Mines.

Methods: In this research, the causes of fire were determined using FTA method. In order to calculate the probability of basic events and eventually reach the rate of occurrence of the top event (risk of fire) and regarding this fact that the possibility of achieving precisely the basic events in the fault tree of this event is difficult and with uncertainty, so fuzzy logic and fuzzy numbers were used to assign probability weight to basic events. Then the probability of top event was determined using the appropriate equations. The critical Minimal Cut Sets (MCS) were determined using Fussell-Vesely equation.

Results: The results show that the probability of the risk of fire in Eastern Alborz Coal Mines is 39.38%, so that it is the high levels of risk to staff involved in this vital and important industry. The existence of gas and coal dust in site of welding was identified as the most critical parameter.

Conclusion: Use of fuzzy logic in fault tree analysis method increase accuracy and reduce uncertainty in calculations. Also it makes the evaluations easier.

Keywords: Fire, Coal Mines, Risk Assessment, Fault Tree Analysis Method (FTA), Fuzzy Logic.

1. MSc of Extraction Mining, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. (**Corresponding author**) Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. f.sereshki@gmail.com
3. Professor, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
4. HSE manager of Tazareh coal mines, Shahrood, Iran.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-05-23]